

1 燃料与燃烧计算

重点：煤的工业分析、元素分析、发热量等，理论空气量和过量空气系数

1 燃料的分类组成

- 可燃：碳、挥发分&不可燃：灰分、水分

燃料	可燃（有机）成分	不可燃成分	
固（液）体燃料	C（碳） H（氢） O（氧） N（氮） S（硫） 以上成分加热时析出可燃气体，称挥发分，剩余物称固定碳或残焦	A （灰分） $\left[\begin{array}{c} Al \\ Fe \\ Ca \\ Mg \\ K \\ Na \end{array} \right]$ 的 碳酸盐 硫酸盐 硅酸盐 磷酸盐 硫化物	M （水分） M_1 （湿分或外在水分） M_{ad} （内在水分）
气体燃料	CH_4 （甲烷） CO （一氧化碳） H_2 （氢） C_2H_4 （乙烯等不饱和烃） C_nH_n （各类烃） H_2S （硫化氢）	O_2 （氧） N_2 （氮） CO_2 （二氧化碳） SO_2 （二氧化硫） A 少量 M 少量	

★ 燃料成分的基准及换算

- 基准 M 表示水分 A 表示灰分

收到基：CHONSMA 包含内水外水 SA

空气干燥基：CHONSMA 无外水 SA 用于煤质分析

干燥基：CHONSA

干燥无灰基：CHONS

基准换算：

- 总思想：质量守恒，绝对含量不变，即成分*百分比恒定 书P21
 $X = X_0 \cdot K$

表 3-1 不同基准的换算系数 K

X_0 \ X	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

2 煤炭

- 元素分析

煤的元素分析是指对煤中碳、硫五种氢、氧、氮元素分析的总称。

元素分析时，碳、氢、氮和硫是直接测量得到，而氧是通过差减法获得。

▼ 工业分析

- 确定煤中水分AD、挥发分(V)、固定碳(FC)和灰分(A)等四种成分的质量百分数
- FC由差减法得到

▼ 水分

- 分类
 - 外在水分是指附着于煤粒表面的水和存在于直径大于0.1um的毛细孔中的水分。这种水分**以机械的方式与煤相结合**。外在水分多少与外界条件及煤的粒度有关，而与煤质无关。
 - 内在水分是指吸附或凝聚在煤粒内部毛细孔(直径小于0.1um)中的水分。**以物理化学方式与煤相结合**。
 - 结晶水是指以化学方式与煤中矿物质结合的水。
 - **全水分=内在+外在**
- 水分增加影响*6 P20
降低燃烧温度/着火发生困难/锅炉效率降低/增加烟气体积/低温受热面腐蚀/磨煤机出力下降

▼ 挥发分

- 主要为有机物
- 影响：越多利于燃烧，且析出以后有孔隙，反应表面积增多，利于反应

▼ 灰分

- 矿物质
- 危害：着火不易；炉膛结渣；积灰磨损；环境污染

▼ 固定碳

- 燃料比：固定碳与挥发分之比

▼ 硫分

- 有机硫、黄铁矿硫、硫酸盐硫
- 危害：
 - 在水冷壁、过热器、再热器等高温受热面造成高温腐蚀，沾污和结渣
 - 在省煤器、空预器等低温受热面、烟气等造成低温腐蚀、受热面积灰和烟道堵塞
 - 增加烟气SO₂浓度

▼ ★ 煤的发热量：单位质量的煤完全燃烧所释放出来的热量

- 弹筒发热量：用氧弹式量热计测定
反应过程生成酸会放热，所以测出来的比实际放热量大

- 高位发热量：煤样在氧弹内燃烧时产生的热量(即弹筒发热量)减去硫和氮生成酸的校正值后所得的热量
- 低位发热量：高位发热量减去煤样中水和燃烧时生成的水的蒸发潜热后的值
- 标准煤：收到基低位发热量为29310kJ/kg

▼ 煤炭的分类

- 挥发分小于10% 无烟煤；挥发分大于10% 烟煤；挥发分大于37% 褐煤

▼ 无烟煤：煤化程度最高

- 含碳最多50-95%，灰分少，挥发分最少，发热量最高
- 不易燃烧

▼ 烟煤

- 含碳40-70%
- 挥发分普遍较高，易燃

▼ 褐煤：煤化程度最低

- 含碳40-50%，水分较高，挥发分最高40-50%
- 易燃，易风化，化学反应性强
- 除用挥发分区分外，透光率P和含最高内在水分的无灰高位发热量 $Q'a$ 也可区分褐煤和烟煤

▼ 3燃料的燃烧计算

- 理论空气量：1kg收到基燃料完全燃烧且没有剩余氧存在时所需的空气量，m/kg(标准状态下) 具体计算方法见28页
- 理论烟气量：1kg收到基燃料，在供以理论空气量 V 的条件下完全燃烧时，生成的烟气体积称为理论烟气量，m³/kg(标准状态下)
- 过量空气系数 a ：实际供给的空气量 V 与理论空气量 V_0 的比值， $a=V/V_0$
- 漏风系数 Δa ：相对于1kg燃料而言，漏入的空气量 ΔV 与理论空气量 V 之比

▼ 4涉及的第八章知识

- 锅炉机组热平衡：指输入热量和输出热量之间平衡
排烟热损失占比max

热平衡关系式：

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \text{kJ/kg}$$

Q_r — 1kg燃料带入炉内的热量，kJ/kg；

Q_1 — 锅炉有效利用热量，kJ/kg；

Q_2 — 排烟热损失，kJ/kg；

Q_3 — 化学（气体）未完全燃烧热损失，kJ/kg；

Q_4 — 机械（固体）未完全燃烧热损失，kJ/kg；

Q_5 — 锅炉散热损失，kJ/kg；

Q_6 — 其他热损失，kJ/kg；

2煤粉制备

重点：煤粉特性；煤粉机结构和工作原理；直吹式和中间仓储式制粉系统

▼ 1煤粉的性质

- 密度较小，松散
- 比表面积大，能吸附大量空气，流动性好，有“自流”现象

▼ 煤粉的自燃和爆炸

- CO出现可作为自燃的标志
- 爆炸

判断煤粉的爆炸性的分类准则是爆炸性指数Kd

影响因素：

- ① 挥发分 $V_{daf} < 10\%$ 无爆炸危险；
- ② 细度 $\geq 200\mu m$ ，不会爆炸但会自燃；
- ③ 温度升高，容易自燃和爆炸；
- ④ 浓度：存在危险浓度范围，烟煤：0.25-3kg(煤粉)/kg(空气)，温度：70-130℃，遇点火源就会爆炸。
- ⑤ 水分太低易引起自燃和爆炸， $M_{mf} > M_{ad}$ ，不易爆炸
- ⑥ 干燥剂或煤粉气流，含氧 $\leq 15\%$ ，不易爆炸

- 煤粉颗粒的尺寸是指它能通过的最小筛孔的尺寸，称为煤粉粒子的直径

▼ 细度

- 煤粉细度指在一定的振动强度和筛分时间下，一定质量的煤粉通过一定尺寸的筛孔进行筛分时，筛上剩余量占筛分煤粉总量的百分比，用 R_x 表示， x 表示孔径。

$$R_x = 100a/(a+b), \% \quad \mu m$$

a —筛孔上剩余的煤粉质量，g； b —通过筛孔的煤粉质量，g

- 烟煤和无烟煤常用R90与R200同时表示煤粉细度和均匀度；褐煤用R200与R500。R90越大，煤粉越粗。

▼ 颗粒组成特性

- P38 2-2 破碎公式
- n 表示煤粉均匀性指数， n 越大，则R90大，小于90的少，则越均匀
- b 表示煤粉粗细的系数， b 越大，煤粉越细

- 影响煤粉经济细度的因素：
 - 挥发分高，煤粉可以粗些；无烟煤往细了磨，褐煤不用磨太细
 - 均匀性指数大，煤粉可以粗些；
 - 炉膛燃烧强度大，煤粉可以粗些

▼ 2煤的可磨性与磨损性

▼ 煤的可磨性系数

- 煤是否易于破碎磨细的特性，是制粉系统(磨煤机和系统)选择的重要依据
- 表示方法一：

指在风干状况下，将同一质量的标准煤和试验煤由相同的初始粒度磨碎到相同的煤粉细度时所消耗的能量之比。

- 表示方法二：哈氏可磨性指数

计算： $HGI=13+6.93D_{75}$

D_{75} 为通过筛子的煤粉质量百分数

我国动力煤HGI：25-129 大于86易磨煤，小于62难磨煤

▼ 煤的磨损指数

- 定义：表示该煤种对磨煤机的研磨部件磨损轻重的程度
- 测量方法
 - 国际上：常用旋转磨损试验仪，根据试片被磨损的质量，计算磨损系数
 - 我国：“煤的冲刷磨损指数试验方法”，磨至R90=25%所需时间及磨损量，和标准煤比

▼ 3磨煤机

- 原理：依靠击碎、压碎和研碎等原理磨制煤粉
- 作用：磨煤、完成过程干燥

▼ 磨煤机的分类

▼ 按工作转速分 !感觉下面更重要这个可能只是陪跑....

- 低速磨煤机：转速15 ~ 25r/min，如钢球磨煤机，它主要以撞击、挤压、研磨原理将煤磨成粉
- 中速磨煤机：转速25 ~ 100r/min，如平盘磨（RP）、环球磨（E磨）、碗式磨、MPS磨，中速磨主要以碾压原理将煤磨成粉
- 高速磨煤机：转速425 ~ 1500 r/min，如风扇磨、锤击磨，主要以撞击原理将煤磨成粉

▼ 筒式钢球磨煤机——低速 P41

▼ 单进单出钢球磨煤机

- 钢球直径：磨煤电耗与金属磨损总费用最小原则确定
- 通风量：主要与煤粉粗细有关
- 筒内存煤量：通过运行确定磨煤出力与载煤量的对应关系
- 优点：煤种适应性强；磨煤最细，对无烟煤适合；结构简单，运行可靠性高；维护方便，维修费用低
- 缺点：设备大，噪音大，磨损大，投资高，电耗高，不宜在低负荷运行

▼ 双进双出钢球磨：两侧同时进出煤和煤粉

- 运行特点
 - 微转装置：停机或检修时微转，剩煤不必清空；
 - 旁路风：干燥预热原煤；在低负荷时，确保输粉管道和煤粉分离器内始终保持最佳风速；
 - 可单侧使用，低负荷能力强；
 - 磨煤机出力受锅炉负荷影响；
 - 调节一次风量适应锅炉负荷变化，风粉比不变。

▼ 中速磨

▼ 工作原理

- 二组碾磨部件相对运动，产生挤压或碾磨作用
- 干燥剂由下进入，携带煤粉向上进入粗粉分离器分离，粗粉落回碾磨区重磨
- 主轴垂直布置，立式磨煤机
- 包含四部分：驱动装置、研磨部件、干燥分离空间、气粉混合物分配装置

▪ 基本种类

- 碗式—圆锥台磨辊+磨碗，又称HP磨或RP磨
- 球环式—大直径钢球+上下磨环，又称E型磨
- 轮式—轮胎形磨辊+下磨环，又称MPS磨或轮胎磨

▪ 电耗：RP型磨 < MPS型磨 < E型磨

▪ 耐磨损性：RP型磨 < MPS型磨 < E型磨

▪ 优点：主打一个效果好/效率高/能耗低

启动迅速，调节灵活；磨煤电耗低；结构紧凑，占地少，磨煤机与粗分装在一體；钢耗少，噪音低；金属磨损量小；转速高，碾磨效果高，效率高。

▪ 缺点：煤质、工作条件、技术要求高

对杂质敏感，工作条件要求苛刻；结构复杂，运行和维修技术要求高；不能磨制磨损指数高的煤种；要求水分低(外在水分 $\leq 15\%$)；储粉能力小，响应时间长。

► 风扇磨——高速 4

▼ 磨煤机选择

- 原则：燃料性质、细度要求、运行可靠性、金属消耗量、运行费用和投资成本

项目	低速	中速	高速
运行可靠性	最好	次之	较差
适用煤种	不限	烟煤	褐煤
Mar	不限	5~8(<15)	不限(建议高水份)
可磨性系数 K_{km}	不限	>1.2~1.3	>1.3
Aar	不限	<25~30	<25~30
细度范围 R_{90} (%)	4~35	4~35	25~50
均匀性指数 n	0.7~1.0	1.1~1.3	0.9
设备耗量及投资	最大	较小	最小
运行费用：电耗(kw.h/t)	最大(15-29)	较小(6-12)	最小
运行费用：金属磨耗(g/t)	100-150	10-20	15-30
运行费用：检修维修费	最大	较大	较小

▼ 4制粉系统

以磨煤机为核心的把原煤制成合格煤粉的系统，称为制粉系统

- 制粉系统有直吹式和中间储仓式两种

▼ 中储式制粉系统流程：负压运行

- 适用于单进单出钢球磨煤机

- 磨煤机——细粉分离器(细的落入煤粉仓)——乏气分离器顶部出升压后作一次风(一次风要求高温即热风送粉时，作三次风)

一次风：大部分空气从炉排下方引入，供上层燃料层燃烧

二次风：少量空气在炉膛的适当部位送入炉膛空间，以引导烟气流向，加强炉膛中可燃气体的混合和燃烧

三次风：指热风送粉的储仓式制粉系统中通过专用喷口送入炉膛的乏气，可以对未分离的少量煤粉加以利用。位置通常布置在拱式燃烧炉膛前、后燃烧器的上方

- 乏气再循环管协调输送风、干燥通风和一次风(三次风)

- 优点：磨粉细；煤种适应性较广，可采用热风送粉，保证低挥发分煤的燃烧；对锅炉负荷的响应快

- 缺点：系统复杂，占地大，初投资多；输粉管道长，运行电耗较大

▼ 直吹式制粉系统：正压、负压都有

- 适用于中速磨、风扇磨、双进双出钢球磨煤机

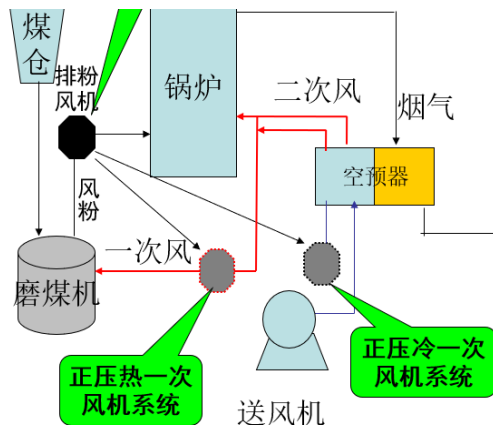
- 煤经磨煤机磨成煤粉后直接吹入炉膛燃烧

▼ 负压系统：

- 全部煤粉通过排粉机
- 磨损严重，运行电耗高

▼ 正压系统：

- 只有空气通过排粉机
 - 无磨损，向外冒粉，需要高压密封
 - 分为热一次风机系统和冷一次风机系统
- 二者优劣对比*4 P53



▼ 制粉系统选择

- 当燃用无烟煤、贫煤时，选低速筒式钢球磨热风送粉的储仓式制粉系统
- 当燃用挥发分较高及较硬的煤时，选低速筒式钢球磨乏气送粉的储仓式制粉系统
- 对于中速磨煤机，风扇式磨煤机应，先选用直吹式制粉系统

燃烧理论

• 1.燃烧基本理论

- **燃烧**的定义：是通过燃料和氧化剂在一定条件下，所进行的具有发光和发热特点的剧烈的氧化反应
- **燃烧学**的定义：是研究燃烧过程基本规律及其应用技术的科学。它包括两方面的内容：燃烧理论和燃烧技术
- 燃烧反应速度

- 物理条件（传热和传质）

- 气流扩散速度
- 热量传递速度
- 在锅炉燃烧技术中，起主要作用的是气流扩散速度，包括氧气向碳粒表面的扩散和燃烧产物的反向扩散

- 化学条件

- 温度
- 反应物质的浓度
- 反应空间的压力
- 在锅炉燃烧技术中，其影响因素主要是温度

- 阿累尼乌斯公式

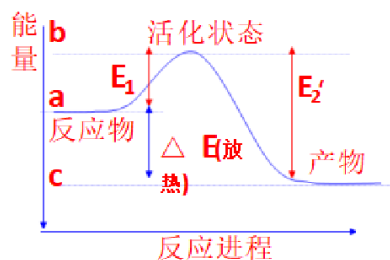
$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}$$

- 反应速度公式

$$\omega_B = -\frac{dC_B}{dt} = kC_B^b = k_0 C_B^b e^{-\frac{E}{RT}}$$

- 活化分子与活化能

- 化学反应的先决条件是反应物分子必须先发生碰撞



基元反应的能量变化示意图

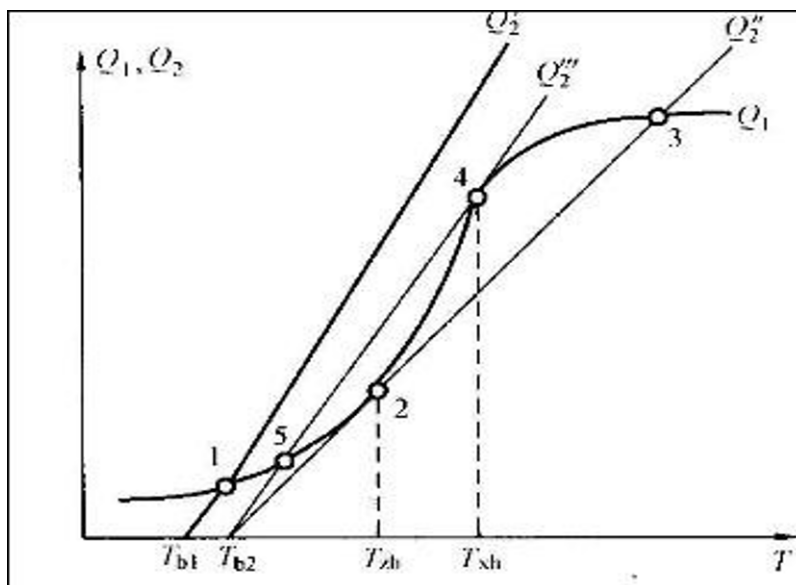
- **有效碰撞**：能引起化学反应的碰撞
- **活化分子**：发生有效碰撞时形成的中间活化物分子
- **化学反应的活化能 E_a** ：活化分子的平均能量(E^*)与反应物分子的平均能量(E)之差
- 温度一定时，活化能越大，活化分子数就越少，反应速度越慢；**活化能越小，反应速度越快**
- 在相同条件下，燃料的焦炭燃烧反应的活化能是不同的，**高挥发分煤的活化能较小**
- **催化反应**
 - **催化剂**：凡能改变反应速率而它本身的组成和质量在反应前后保持不变的物质
 - **催化作用**：催化剂能改变反应速率的作用
 - **催化机理**：主要是改变了反应的途径，从而使反应的活化能发生了改变
- **链锁反应**
 - **定义**：燃烧过程中，自动产生一系列**活化中心（自由基）**，活化中心不断繁殖，经过一系列中间过程，整个燃烧反应就像链一样一节一节传递下去
 - **链引发**：光照、加热使分子断裂产生自由基
 - **链传递**：自由基与反应物分子发生反应，产生新的自由基
 - **链终止**：自由基与器壁碰撞，或两个自由基复合，或与第三个惰性分子相撞后失去能量而成为稳定分子
 - **链锁反应的分类**
 - **不分支反应**：在链传递过程中每消耗一个自由基的同时又生成一个自由基，直至链终止。在整个链传递过程中，**自由基数目始终保持不变**
 - **分支链反应**：就是指一个自由基在链传递过程中，生成最终产物的同时产生两个或两个以上的自由基。**自由基的数目在反应过程中是随时间增加的，因此反应速率是加速的**
- **链式反应——爆炸**
 - **引起爆炸的原因**
 - **由于反应的放热，而热又得不到及时散发，造成了热的积累，使得反应进一步加快，如此循环，最后直至爆炸**
 - 由于存在有支链反应而造成了爆炸
 - 在支链反应中每个自由基原子参加反应可产生两个或多个自由基原子，这些自由基原子又参加直链或支链反应，从而产生更多的自由原子，迅速加快反

应速度，最快可以达到爆炸程度

- 氢气与氧气混合体系的爆炸就是一个链式反应引起爆炸的例子

- 着火

- 着火定义（燃烧的准备阶段）：**由缓慢氧化状态转变到能自动进行并加速到高速燃烧状态的瞬间过程**（转变的瞬间温度成为着火温度）
 - **化学自热**：不需要外界给入热量，在常温下依靠自身的化学反应发生的着火
 - **热自燃(热力着火)**：将燃料和氧化剂混合物迅速而均匀地加热，当混合物被加热到某一温度时便着火(全容积)
 - **点燃(强迫着火)**：用电火花、电弧、热板等高温源使混合物局部地区受到强烈地加热而首先着火、燃烧，随后这部分已燃火焰传播到整个反应体系的空间
- 燃烧过程能否稳定地进行——燃烧过程所处的热力条件
- 放热曲线与散热曲线



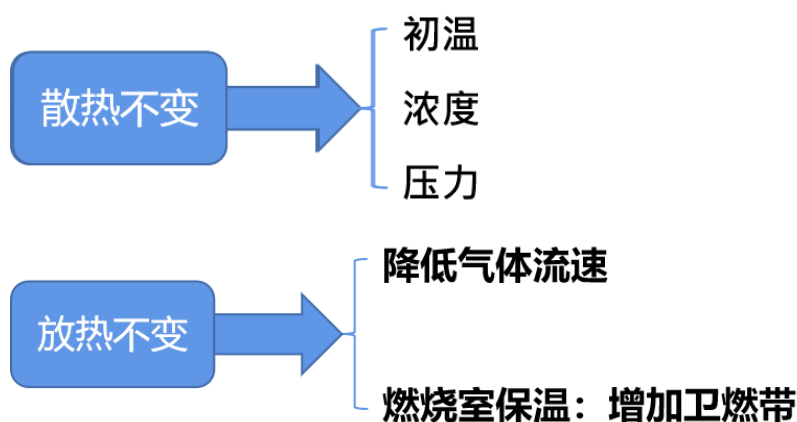
- 1点：稳定的低温缓慢氧化状态
- 2点：热力着火点(不稳定状态)
- 3点：高温燃烧状态
- 4点：热力熄火点
- 5点：低温缓慢氧化状态点
- 稳定着火条件

$$Q=Q$$

$$\frac{dQ}{dT} \geq \frac{dQ}{dT}$$

- 一般熄火温度 T_{xh} 是大于着火温度 T_{zh}
- 熄火温度和着火温度随热力条件而变，不是物理常数，是**相对特征值**
- 对煤：反应能力越强（挥发份 V_{daf} 越高，焦炭活化能越小）的煤，着火点低，容易着火，也易燃烬。反应能力弱的无烟煤着火温度高，也难燃烬

- 加快着火的措施：加强放热、减少散热



- 火焰传播速度

- 定义：火焰传播速度是指火焰前锋沿其法线方向相对于未燃可燃混合气的推进速度
- 其值高低取决于可燃混合气本身的性质、压力、温度、过量空气系数、可燃混合气流动状况(层流或湍流) 以及周围散热条件等

• 2.化石燃料（天然气、石油、煤）

- 定义：化石燃料包括的天然资源为煤炭、石油和天然气等，是由死去的动物和植物在地下分解而形成的，是不可再生资源
- 形成条件
 - 适宜的气候；适宜的地理环境；适宜的地质作用配合

- 煤的组成



- 煤的分子平面结构

- 煤基本结构单元的核心部分主要是缩合芳环，脂环和杂环

- 煤的分子立体结构

- 煤是三维空间高度交联的非晶质的高分子缩聚物

- 液体燃料

- 石油中的碳氢化合物和胶状沥青物质

• 3.气体燃料燃烧

- 定义：气体燃料在特定的环境中完成燃烧化学反应的过程
- 气体燃料：天然气、煤气、液化石油气等

- 特点：灰分极少，燃烧属气相反应，其着火和燃烧容易得多
- 三个阶段
 - 燃料和空气的混合阶段
 - 混合后可燃气体混合物的加热和着火阶段
 - 完成燃烧化学反应
- 两种类型
 - 预混燃烧
 - 全预混燃烧
 - 半预混燃烧
 - 扩散燃烧
- 气体燃料燃烧的方法
 - 燃气的燃烧速度和燃烧的**完全程度**主要取决于**燃气与空气的混合**
 - 按照燃气和空气是否在着火前进行预混合，可将燃气的燃烧方法分为：**扩散式燃烧、大气式燃烧和无焰式燃烧**
 - 扩散式燃烧
 - 指燃气和空气**事先不混合而进行的燃烧**
 - 燃烧所需的氧气依靠**扩散**，从**周围大气**获得
 - 层流状态下，扩散燃烧依靠**分子扩散作用**使周围氧气进入燃烧区；紊流状态下，则依靠**紊流扩散作用**来获得燃烧所需的氧气
 - 由于分子扩散进行得比较缓慢，因此**层流扩散燃烧的速度取决于氧气的扩散速度**。这时燃烧化学反应进行得很快，因而火焰面厚度很小。紊流扩散可使燃烧过程得到强化，火焰长度相应缩短
 - 大气式燃烧
 - **燃气与燃烧所需的部分空气预混合后所进行的燃烧**
 - 其一次空气率一般为0.5~0.6。这种预混的燃烧方法由本生在1855年发明，称为**本生燃烧器**(或本生灯)。
 - 扩散火焰易产煤烟，燃烧温度也相当低。但当预先混入一部分燃烧所需空气后，火焰就变得清洁，燃烧得以强化，火焰温度也有所提高
 - 无焰式燃烧
 - 指在**燃烧前燃气与空气实现全部预混**
 - 混合所需的时间**为零**，燃烧在**动力区**进行。
 - 无焰燃烧需要有**燃烧火道**作为燃烧的場所，用以稳定和强化燃烧过程。
 - 稳定燃烧的范围
 - 气体燃料燃烧时，着火处形成了**火焰面**
 - 火焰面之后是高温的燃烧产物，之前是未燃的可燃混合物

- 火焰面前后有很大的温度梯度，热量向前传播，使邻近的未燃气层温度升高，达到着火温度以后就形成新的燃烧面
- 火焰面不断向未燃气体方向传播的过程称**火焰传播**
- 垂直于火焰面的传播速度称为**法向火焰传播速度**
- 回火与脱火
 - **脱火**：气体混合物的流速在火焰面法线方向的分量高于火焰传播速度时，火焰不断地远离燃烧器火孔，到一定距离之后就完全熄灭
 - **回火**：气体混合物的流速在火焰面法线方向的分量低于火焰传播速度时，火焰会沿着燃烧器混合管道逆向往回燃烧，火焰缩到燃烧器内部
 - 脱火极限(引起脱火的最低气速)和回火极限(引起回火的最高气流速)之间为**稳定燃烧范围**，凡处于脱火极限和回火极限之间的气流速度值都能保证稳定燃烧
 - 一次空气量减小时，稳定燃烧的范围扩大。但一次空气率过小时，发生黄色火焰的可能性增大。当一次空气率增大到某一定值时，回火的可能性最大。减小火孔尺寸，有助于扩大稳定燃烧的范围。
 - 从燃烧的稳定性的来看，扩散燃烧具有最好的性能。随着预混程度的增加，稳定燃烧的范围缩小

• 4.液体燃料燃烧

- 液体燃料的雾化
 - 液体燃烧的前提
 - 液体直径减少，燃烧速度可以加快
- 液体燃料的汽化和混合
 - 汽化过程使得燃料与空气中的氧气能够充分接触，并最终完成燃料与空气的混合过程
 - 轻质液体燃料的汽化是**纯物理过程**
 - 重质液体燃料的汽化包括**化学热裂解混合过程**，与喷嘴特性、进气方式和燃烧室内湍流度等因素有关
- 液体燃料的燃烧特点
 - 燃料油在着火前已蒸发在燃料表面形成一层**燃油蒸汽**
 - 可看作一种**气相物质的均相燃烧**
 - 当达到稳定状态时，**燃料的蒸发速度与燃烧速度相等**，增强蒸发过程可强化燃烧
- 液滴的蒸发
 - 相对静止环境中低温液滴的蒸发
 - 当周围介质的温度低于液体燃料沸点时，在相对静止的环境中液滴的蒸发过程实际上是**分子扩散过程**
 - 斯蒂芬流：**为平衡空气的扩散趋势，必然会产生一个反向流动**。根据质量平衡原理，在液体表面的这个反向流动的气体质量与向液滴表面扩散的空气质量相等。
 - 在给定温差和燃油特性后，蒸发时间只是油滴初始直径平方的函数。因此，**初始直径越大，蒸发所需时间越长**，所以若液体燃料雾化后具有较多的大颗粒液滴，则蒸发时间就

会延长，火炬拖长，燃烧效率降低。

- 5.煤

- 煤的利用方式

- 我国煤炭按用途可分为**动力用煤**、**炼焦用煤**和**化工用煤**

- 煤的热解

- 定义：煤的热解是指将煤在惰性气体气氛下持续加热至较高温度时发生的一系列**物理变化和化学变化**。煤的热解过程实际上是**煤中的大分子**在温度较高时某些弱键从形成轻质的**气态物质和焦油**的过程。
 - 三个阶段
 - 干燥脱气、活泼热分解、热缩聚

- 煤的燃烧

- 4个阶段

- ① **预热干燥阶段**：水分蒸发析出，吸热 $<200^{\circ}\text{C}$ ；
 - ② **挥发分析出并着火阶段**：热分解、析出挥发分，着火，放热 $>200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ ；
 - ③ **燃烧阶段**：挥发分和焦炭燃烧，析出剩余挥发分 组成 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_2H_2 、 C_mH_m 、少量 H_2S 、 N_2 ；
 - ④ **燃烬阶段**：残余焦炭的燃尽，成为灰渣
 - 最重要的是着火和燃尽这两个阶段
 - **煤的燃烧过程的基础是其中的炭的燃烧**
 - 焦炭中的碳是煤中可燃质的主要部分
 - 焦炭着火最晚，它的燃烧是整个燃烧过程中最长的阶段，在很大程度上它能决定整个粒子的燃烧时间
 - 焦炭中的碳燃烧放热量占煤发热量的40%~90%，它的发展对其他阶段的进行有决定性的影响

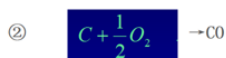
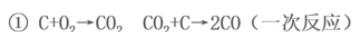
- 碳粒非均相燃烧特点

- 碳粒非均相燃烧过程： $\text{O}_2 \rightarrow \text{扩散} \rightarrow \text{燃烧}$

- 5 个阶段

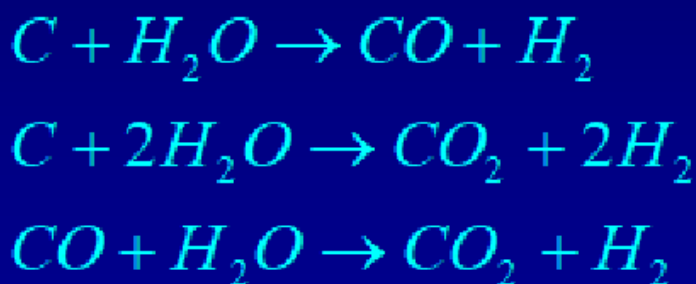
- (1) 气体分子(氧)向碳粒表面的转移与扩散；
 - (2) 气体分子(氧)被吸附在碳粒表面上；
 - (3) 被吸附的气体分子(氧)在碳表面上发生化学反应生成燃烧产物；
 - (4) 燃烧产物从碳表面上解吸附；
 - (5) 燃烧产物离开碳表面，扩散到周围环境中。
 - **吸附与解吸附最快**
 - **扩散与化学反应最慢，但最主要。**因此，碳的多相燃烧速度决定于氧向碳粒表面的扩散速度和氧与碳粒的化学反应速度中速度最慢的一个。

3 种理论:



2025-1-1

- 最终产物 CO₂, 在氧气不足 (还原性) 部分CO, 衡量燃烧好坏指标
- 煤中有水



- 完全燃烧最终 CO₂+H₂O
- 气化就是生成CO, 而不是CO₂ (人为)
- T不高, 反应不烈, $\beta \gg k$, 扩散能力>化学反应能力时
 - ① 燃烧反应速度决定于化学反应速度, 与扩散速度无关;
 - ② 燃烧温度不高, 接近于环境温度。提高T是强化燃烧有效手段, $\uparrow k \geq 1650^\circ C$.
- T $\uparrow$ 化学反应非常激烈, $k \gg \beta$ 化学反应能力>>扩散能力
 - ① 决定于扩散速度, 扩散速度正常与T无关, 燃烧反应速度与k关系不大, 强化措施 $\uparrow \beta$, 加强风速, 扰动, 减少碳粒直径
 - ② 燃烧温度很高 >>环境温度
 - ③ 表面O₂=0
- 动力燃烧区与扩散燃烧区
 - II、IV、V 反应速度快;
 - I (氧 (反应气体) 扩散到碳表面)、III (被吸附的氧与碳反应形成被碳表面吸附的产物) 反应速度慢为反应瓶颈
 - 若反应速度 I $\gg$ III 则为**动力燃烧区**, 燃烧速度受制于燃烧反应动力因素
 - 若反应速度 I $\ll$ III 则为**扩散燃烧区**, 燃烧速度受制于氧向碳表面的扩散速度
- 过渡燃烧区域
 - 实际情况大部分是该区域, T适中
- 煤与煤粉的燃烧特点的对比

- 煤的燃烧特点
 - (1) **煤中含有水**：生成CO、H₂，反应复杂。
 - (2) **挥发分**:对煤粉燃烧有影响：产生热量，形成孔隙结构，更容易燃烧；消耗碳周围氧，增加扩散阻力,不利于燃烧。
 - (3) **产生灰渣**：阻碍扩散，如T↑，结渣，扩散就更困难。
 - (4) **水分和挥发分析出后，形成多孔结构，有利于燃烬**。水煤浆比煤粉好烧就是这个道理。
 - (5) **燃烧过程与燃烧区域**
 - 靠近碳表面的燃烧产物是CO，它扩散离开表面，与氧生成CO₂, CO₂向两个方向上扩散，并在碳表面发生反应还原成CO
- 煤粉燃烧特点
 - 颗粒很小，30—100μm，加热速度快 5000—10⁴°C/S，几个阶段已没有明显区别。
- 影响煤粉气流着火的因素
 - 内在因素：燃料的性质，水分，灰分，挥发分，细度
 - 外在因素：煤粉气流的浓度、一次风量和一风速，锅炉负荷
- 燃烧完全条件
 - 供应充足又合适的空气量
 - 适当高的炉温
 - 空气和煤粉的良好扰动和混合
 - 在炉内要有足够的停留时间

燃烧设备

• 1. 电厂锅炉的燃烧设备

- 电厂锅炉的燃烧设备包括：**煤粉燃烧器、炉膛**等
- 对燃烧设备的总体要求
 - 炉内形成良好空气动力场，迅速稳定着火
 - 及时供应空气，与燃料适时混合，使完全燃烧
 - 稳定燃烧，不结焦
 - 适应煤种与负荷变化
 - 低NO_x
- 煤粉锅炉，燃料流和空气流均通过各自**燃烧器**喷口以**射流**形式送入炉膛
- 燃烧器按**出口气流**特征可以分为：**直流燃烧器**和**旋流燃烧器**两类

• 2. 煤粉锅炉炉膛

- 作用：**保证燃料的完全燃烧，组织炉内热交换、布置合适的受热面满足锅炉容量的要求**
- 设计要求：①适当的炉膛体积②合理的几何形状③便于布置水冷壁 ④燃烧器至炉膛出口有足够行程
- 炉膛设计参数
 - **炉膛容积热强度 qv** ：**每小时送入炉膛单位容积中的平均热量**
 - 好煤（好烧） qv 大， V_1 小。烟煤>贫煤>无烟煤
 - **炉膛截面热负荷 qa** ：**按燃烧器区域炉膛单位截面折算，每小时送入炉膛平均热量**
 - **燃烧器区域壁面热强度 qB**
 - $qB \uparrow \rightarrow$ 火焰越集中，燃烧器区的温度水平就越高 $\rightarrow$ 有利于着火和维持燃烧的稳定，但易造成燃烧器区域壁面的结渣。
 - **燃尽区容积热强度 qbo**
 - qbo 反应了最上层喷口喷出的煤粉在炉内的最短停留时间。 **qbo 愈小，停留时间愈长**
 - **炉膛壁面热强度 qf**
 - 数值愈高表明单位壁面所吸收的热量愈大，说明炉内的烟温水平愈高，过大会造成水冷壁结渣

• 3. 燃烧器

- 作用：
 - **快速稳定着火**：着火点200—300mm；
 - **空气均匀混合**：配风在时间和空间上合理；
 - **稳定安全燃烧**：后期扰动强烈，不结渣；
 - **实现低污染**：低NO_x燃烧；
- 风粉分配：一次风、二次风、三次风

- (1) 一次风是用来输送加热煤粉,使煤粉通过一次风管送入炉膛,同时提供燃烧初期所需空气
- (2) 二次风一般是高温风,配合一次风搅拌混合煤粉,补充煤粉燃烧所需要的空气量
- (3) 三次风一般是在热风送粉时由制粉系统的乏气从单独布置的喷口送入炉膛,以利用未分离掉的少量煤粉燃烧产生热量

• 分类

• 直流燃烧器

- 直流燃烧器通常由一系列矩形、多边形或圆形喷口组成。煤粉气流和热空气从喷口射出后,形成直流射流
- 直流射流的主要特点: 沿流动方向的速度衰减比较慢, 具有比较稳定射流核心区, 且一次风和二次风的后期混合比较强
- 卷吸: 射流带动周围介质一起流动, 从而使射流质量逐渐增加的过程
 - 卷吸能力分析
 - 高温烟气进入射流——着火
 - 外层空气进入射流——燃尽
 - 小喷口有利于卷吸
 - 外表面积大的扁喷口或多边喷口有利于卷吸
 - 凡有利于卷吸的都不利于射程
 - 相同面积下, 方喷口的射流外边界面(发生卷吸作用面)相对增加, 使卷吸能力加强, 射程缩短
- 煤粉空气射流的特性: 射程与卷吸能力
 - 影响因素: 喷口形状(高宽比)与尺寸、初速度
- 燃烧与配风方式
 - 直流燃烧器均采用四角布置, 被称为四角切圆燃烧方式
 - 配风形式
 - 均等配风
 - 燃烧器的一、二次风喷口通常交替间隔排列, 或一次风口背火侧布置二次风口
 - 特点: 相邻两个喷口的中心间距较小, 一、二次风喷出后很快混合
 - 适用: 容易着火(挥发分含量较高)的煤, 如烟煤、褐煤等
 - 分级配风
 - 二次风分级分段地送入燃烧的煤粉中, 一次风口集中布置, 二次风口分层布置, 一、二次风口之间保持较大距离
 - 特点
 - 一次风口集中布置, 燃烧放热集中, 火焰中心温度升高, 有利于劣质烟煤或无烟煤的着火燃烧
 - 二次风混合较迟, 二次风分级供给

- 一次风率和一次风速低，二次风速高
 - 适用：**不易着火**（挥发分含量较低）的煤，如无烟煤、贫煤、劣质烟煤
 - 目的：在燃烧过程不同时期的各个阶段，**按需要送入适量空气**，保证煤粉**稳定着火、完全燃烧**
- 三次风
 - 对无烟煤，贫煤，为了热风送粉，**乏气作为三次风**，因温度较低 60~70℃，对燃烧有影响，10~45%，速度高，穿入炉内，常向下倾斜 5°~15°
- 特殊二次风
 - 周界风、夹心风、十字风
 - 共同目的：**补气、加强刚性、保护喷口**
 - 周界风：保护喷口、加强刚性、**不是有利于着火**，总之用于好煤
- 工作原理
 - 煤粉气流卷吸高温烟气而被加热
 - 射流的相互撞击、射流两侧的补气及压力平衡
 - 煤粉气流的着火：**上游邻角高温火焰的冲击加热**，着火后的煤粉气流再去点燃下游邻角的煤粉气流，**相互引燃**
 - 煤粉与二次风空气的混合：相互卷吸，混合充分
 - 四股气流形成的切圆旋转
 - 焦炭的燃尽：气流螺旋形旋转上升：改善火焰充满度，延长煤粉停留时间，有利于燃尽
- 特点
 - 煤粉气流吸热量大
 - 火焰在炉内充满度较好，燃烧后期气流扰动较强
- 气流偏斜问题
 - **运行中容易发生气流偏斜而导致火焰贴墙，引起结渣以及燃烧不稳定现象**
 - 邻角气流的撞击
 - 切圆直径的膨胀
 - 燃烧器的高宽比(hr/b)越大偏斜越严重
 - 射流两侧“补气”条件：卷吸在射流两侧形成负压，两侧补气条件不同，则负压不同，形成负压差
- 切圆直径
 - 当切圆直径较大时，煤粉的着火条件较好，气流旋转强烈，气流扰动大，可燃物与空气流的混合加强，有利于煤粉的燃尽
 - 但是，切圆直径过大，会带来下述的问题
 - (1) **火焰容易贴墙**，引起结渣；

- (2) 着火过于靠近喷口，容易烧坏喷口；
- (3) 火焰旋转强烈时，产生的旋转动量矩大，这将使炉膛出口烟温分布不均匀程度加大，引起较大的热偏差，导致过热器结渣或超温

- 旋流燃烧器

- 工作原理

- 煤粉气流或热空气通过旋流器时，发生旋转，从喷口射出后即形成**旋转射流**
 - 利用旋转射流，能形成有利于着火的高温烟气回流区，并使气流强烈混合

- 特点

- 三个方向速度：
 - 轴向速度：衰减比切向速度慢
 - 径向速度：使**扩展角比直流射流大**，随旋转强度增大而增大
 - 切向分速度：衰减很快，即**旋转效应衰减很快**
 - 内回流区：对着火和燃烧影响很大
 - 射流中心有低压区，径向和轴向有压力梯度
 - **轴向反向压力梯度，吸引气流沿轴线反向流动，产生内回流区**
 - 卷吸周围介质的能力比直流射流大
 - 早期混合强烈，后期混合较弱
 - 扩展角大，衰减快：扩展角为气流外边界所形成的锥角
 - 决定旋转射流旋转强烈强度的特征参数 n ，由**旋转动量** M 和**轴向动量** K 组成

$$n = \frac{M}{KL}$$

- 旋流强度大小决定了气流结构形式：**封闭气流（弱旋气流）、开放式旋转射流、全扩散式旋转射流**
 - $n \uparrow$ 回流量 $\uparrow$ 回流区由长瘦变为短胖型
 - $n \uparrow$ 扩流角 $\uparrow$ 气流射程 $\downarrow$ 衰减 $\uparrow$

- 直流与旋流的比较

- 1) 气流结构

- **直流射流**：衰减慢，早期混合差，后期扰动强烈；有假想切圆；
 - **旋转射流**：衰减快，早期混合强烈，后期扰动弱；存在内回流区；

- 2) 布置方式

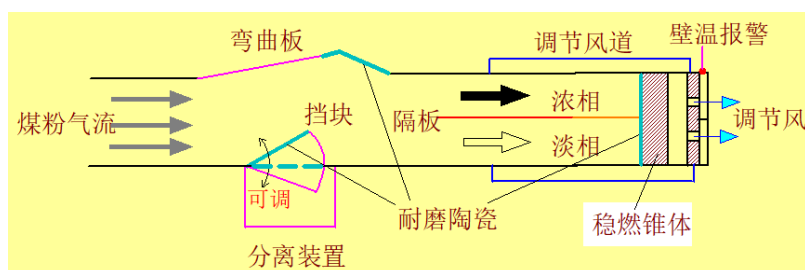
- **直流**：四角布置，又称角置式燃烧器，一、二次风布置灵活，有集中、均等之分，对锅炉截面尺寸有要求
 - **旋流**：墙式布置，又称墙式燃烧器，一、二次风内外布置，对锅炉截面尺寸无要求。

- 3) 着火源不同

- **直流**：以邻角（上游）火焰冲扫根部为主，自身外回流为辅；
 - **旋流**：以自身内回流区为主，外回流为辅。
- 4) 烟温偏差
 - **直流**：因气流在炉内旋转，在炉膛出口存在扭转残余，造成风速差，引起烟温偏差，顺时针，左高右低；逆时针，右高左低；
 - **旋流**：无旋转，烟气温度和速度分布较均匀，向大容量发展，直流将受限制。
- 5) 其他
 - **直流**：四角煤粉差允许大一些，火焰中心可调，炉膛尺寸受限制。
 - **旋流**：不允许，会造成水冷壁局部热负荷不均匀，火焰中心不可调，炉膛尺寸不受限制，热负荷不均匀
- 4.煤粉气流的着火
 - 着火热(乏气送粉)
 - 将煤粉气流加热到着火温度所需的热量
 - 包括：加热煤粉、一次风、煤粉中水分蒸发、过热所需要的热量
 - 煤粉气流着火的影响因素
 - 燃料性质
 - 挥发分 V_{daf} ：低，着火温度提高
 - 水分：水分高，着火热提高
 - 灰分：高，着火热增加
 - 煤粉细度：细，比表面积大，本身热阻小，易着火
 - 炉内散热条件（卫燃带，结渣）、
 - 煤粉气流初温：初温高，易着火（热风送粉）
 - 一次风量和风速：大，不易着火；小，氧量不够，且喷口烧坏，堵塞
 - 燃烧器结构特性：一二次风混合，混合早，不利于着火
 - 锅炉负荷：低负荷不利于着火，降负荷受限制
 - 煤粉火炬的稳燃技术（煤粉强化着火及稳定燃烧技术）
 - 制粉系统方面
 - 尽量避免煤质大幅度变化
 - 选择经济的煤粉细度
 - 提高一次风粉混合物温度
 - 提高风粉混合物中煤粉浓度
 - 炉膛设计方面
 - 合理选择炉型
 - 燃烧器方面
 - 建立起有利的着火区

- 合理的喷口布置和配风
- 增加预燃点火稳燃装置

- 煤粉浓缩的方式：可调煤粉的浓淡燃烧器



- 技术特点
 - 煤种和负荷适应性广，调节性能好
 - 阻力小
 - 低负荷稳燃效果好
 - 喷口及主要部件耐磨耐热，寿命长
 - 有良好的防结渣性能
 - 燃烧器喷口超温报警系统
 - 低NO_x排放
 - 改造简单，操作方便，容易掌握
- 浙大改进：旋流燃烧器喷口的改进：梅花形喷口

- 5.低NO_x燃烧器技术

- 定义：根据NO_x的生成机理.在煤的燃烧过程中通过改变燃烧条件、或合理组织燃烧方式等方法来抑制NO_x生成的燃烧技术

- 燃煤锅炉NO_x的生成机理

- **热力型**：参与燃烧的空气中的氮在高温下氧化产生的氮氧化物（反应慢、温度起决定作用）（通过控制火焰温度、氧气浓度，缩短煤在高温区停留时间来抑制）
 - 抑制热力型NO_x的原则
 - 降低过量空气系数
 - 降低燃烧温度
 - 缩短烟气在高温区的停留时间
- **快速型**：来源也是空气中的氮，机理复杂
- **燃料型**：燃料中的N，600-800℃下生成（大多为有机氮，约只有20%-25%的燃料氮转化成，而且受过量空气系数影响很大）

- 常见的低NO_x燃烧技术

- **烟气再循环技术**
 - 定义：指将一部分燃烧后的烟气再返回燃烧区循环使用的方法
 - 原理：由于这部分烟气的温度较低（140~180℃）、含氧量也较低（8%左右）。因此可以同时降低炉内的燃烧区温度和氧气浓度。从而有效地抑制了热力型NO_x的生成

- 再循环率：再循环的烟气量与不采用再循环时的总烟气量的比值（一般再循环率控制在15%~20%.此时NO_x排放可以降低25%左右）
- 空气分级燃烧技术
 - 定义：通过调整燃烧器及其附近的区域或是整个炉膛区域内**空气和燃料的混合状态**，以实现总体NO_x排放量大幅下降的燃烧控制技术
 - 两个阶段
 - **富燃料燃烧阶段**：氧气浓度、燃烧速度、温度均较低，抑制热力型NO_x的生成，由于不能完全燃烧，部分中间产物将部分NO_x还原成N₂
 - **富氧燃烧阶段**：燃料燃尽，温度已经降低，新生成的量NO_x十分有限
 - 根据分级燃烧实现的**区域和方式**分类
 - **通过燃烧器设计实现空气分级**
 - 同轴燃烧技术
 - **直流燃烧器浓淡燃料燃烧技术**
 - 在燃烧器喷口前，经过惯性分离等方法使一次煤粉气流分离成煤粉浓度不同的两股煤粉气流，一股煤粉气流实现富燃料燃烧，其火焰稳定，另一股煤粉气流进行贫燃料燃烧
 - **旋流燃烧器空气分级技术**
 - 关键是需要尽可能延长煤粉燃烧时与二次风混合的时间.避免形成高温富氧的环境
 - **通过加装一次风稳燃体实现空气分级燃烧**
 - ①方法：在燃烧器喷口处增设不同形状的**稳燃体**
 - ②作用：不仅可以起到**稳定燃烧和强化着火**的作用，同时可以改变喷口区域空气与煤粉的**混合和流动状态**，使之在某些区域先发生富燃料反应
 - **通过炉膛布风实现空气分级**
 - 定义：通过炉膛布风空气分级燃烧将范围扩大到接近整个炉膛
 - 基本方法：使燃烧器附近的过量空气系数控制在**0.8左右**，发生**富燃料燃烧**。然后在燃烧器上方通入**剩余空气**，在第一段燃烧区所生成的烟气混合，在**富氧**的条件下完成全部燃烧过程
 - 可以减少20%~30%的NO_x排放量
- **低过量空气燃烧（LEA）**
- **浓淡偏差**

蒸发受热面

- 补充：锅炉五大受热面
 - 锅内过程设备
 - 蒸发受热面
 - 水冷壁
 - 对流受热面
 - 过热器
 - 再热器
 - 省煤器（尾部受热面）
 - 空预器（尾部）
- 蒸发受热面（辐射换热）
 - 锅炉汽水吸热量分配
 - 水的加热（给水温度到饱和）：省煤器
 - 水的蒸发（相变，饱和水到饱和蒸汽）：水冷壁（超临界下，无相变，用作省煤器和过热器）
 - 蒸气过热（饱和蒸汽到主参数过热蒸汽）：过热器
 - 汽包锅炉受热面（循环系统）
 - 自然循环蒸发受热面系统
 - 构成：汽包—下降管—水冷壁（上升管）—汽包
 - 水冷壁分为若干独立回路，有相应的水冷壁管、联箱、引出管
 - 控制循环蒸发受热面系统
 - 构成：汽包—下降管—循环泵—水冷壁（上升管）—汽包
 - 控制循环与自然循环区别
 - 控制循环有循环泵，弥补蒸汽参数提高后汽水密度差减小造成的自然循环推动力不足
 - 控制循环可以简化循环系统，不必设置独立回路，通过下水包内的节流圈调节水流量
 - 循环泵使循环回路设计有更多余地，水冷壁管径减小，汽包上下温差减小
 - 汽包锅炉水冷壁（型式）
 - 作用：保护炉墙，强化传热，防止结渣，实现锅炉水的气化过程
 - 光管水冷壁
 - 膜式水冷壁
 - 水冷壁管组成的连续钢制结构
 - 鳍片管、光管与扁钢焊接膜式管
 - 利于炉膛密封、减轻砖墙热负荷和保温材料重量

- 销钉式水冷壁
 - 燃烧器周围炉墙布置保温卫燃带（结焦）
 - 卫燃带作用：
 - （布置于燃烧区）减少水冷壁吸热，提高燃烧区温度
 - （布置于炉膛上部）提高炉膛烟气出口温度，进而提高对流受热面蒸气温度
 - 内螺纹管水冷壁
 - 增强扰动，强化传热，推迟两相流体传热恶化
- 汽包（锅筒）
 - 最重、最庞大
 - 作用
 - 接受省煤器的给水和水冷壁的汽水混合物，汽水分离
 - 容积大，有一定蓄热能力，对锅炉负荷变化由缓冲
 - 给药管，处理循环水，避免在回路中沉积水垢
- 直流锅炉蒸发受热系统
 - 蒸发受热面
 - 无汽水两相共存，蒸发热为0，无需汽包
 - 运行压力有可能不达超临界（需要分离器，超临界状态为直流式部件，作用类似汽包）
 - 变负荷运行，机组负荷降低
 - 设备刚启动时，压力较低
 - 给水泵—省煤器—水冷壁—分离器（其中蒸气送到过热器）—再循环泵—省煤器
 - 水冷壁
 - 螺旋管圈式（下辐射区，热负荷高）
 - 管子长度大
 - 制造、安装较为复杂
 - 管间热负荷均匀，热偏差小，水动力稳定，无需节流圈，可避免传热恶化
 - 立式管屏式（上辐射区，以折焰角为分界）
 - 结构简单，利于悬吊
 - 管间热偏差大，需要节流圈
 - 上、下辐射区水冷壁连接
 - 联箱（混合联箱）
 - 分叉管

过热器和再热器

- 工作特点和作用

- 目的：提高蒸气焓值
- 作用
 - 提高循环效率
 - 控制汽轮机末级叶片蒸气湿度
 - 过热器
 - 饱和蒸气——过热蒸气
 - 调节蒸气温度
 - 再热器
 - 将高压缸排气再加热到与过热蒸气温度接近（相等）
- 工作特点
 - 锅炉中工质温度最高的部件
 - 运行中应保持汽温稳定
 - 要有可靠的调温手段
 - 尽量防止或减少平行管间热偏差

- 型式和结构

- 对流式
 - 锅炉对流烟道内
 - 流向
 - 逆流式（传热温压最大，节省金属）
 - 顺流式（安全）
 - 混合式（先逆流、再顺流）
 - 管子布置方式（多管圈结构，利于大容量锅炉维持蒸气速度）
 - 立式——支吊结构简便
 - 卧式——利于停炉时排水
- 半辐射式（烟气对流与炉内直接辐射）
 - 屏式过热器/再热器
 - 前屏：布置于炉膛上部，降低炉膛出口烟温，改善过热/再热蒸气气温特性
 - 后屏：炉膛出口处，降低烟气温度，防止对流受热面结渣
 - 安全性问题（过热器系统最薄弱）
 - 平行管之间热偏差大
 - 管长差异较大，蒸气流量不同
 - 机组启动容易壁温超温

- 改善：外圈管子（热负荷大）采用大管径、较短长度
- 辐射式
 - 布置在炉内上辐射区
 - 紧贴水冷壁
- 附加受热面（换热量不大）
 - 顶棚过热器
 - 炉膛顶部
 - 支撑炉顶耐火材料，保持锅炉严密性
 - 包覆过热器
 - 水平烟道和尾部竖井壁面上
 - 提高炉墙严密性，反止漏风
- 汽温特性
 - 定义：过热器与再热器出口蒸汽温度与锅炉负荷（或工质流量）之间的关系
 - 过热器汽温特性
 - 辐射过热器出口蒸汽温度随负荷增大而下降
 - 对流过热器出口蒸汽温度随负荷增大而上升
 - 半辐射式出口蒸汽温度较平稳
 - 再热器
 - 定压运行，出口汽温随负荷增大而上升
 - 变压运行，汽温较稳定，维持在额定值
 - 适合比例的辐射和对流受热面可以获得比较平稳的汽温特性
 - 与汽温额定值偏差
 - 过热器： $\pm 5^{\circ}\text{C}$
 - 再热器： $+5^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$
- 汽温特性影响因素
 - 锅炉负荷
 - 过量空气系数
 - 越大，烟气多，对流过热气温越高
 - 给水温度
 - 升高，过热器出口汽温下降
 - 受热面污染
 - 炉膛结渣，过热器汽温上升
 - 过热器结渣，汽温下降
 - 燃烧器运行方式
 - 喷嘴向上倾斜，火焰中心位置提高，过热汽温升高
 - 燃料种类

- 燃油时，着火快，火焰中心低，过热汽温降低
- 燃水比（直流锅炉）
 - 给水量与燃料量之比
- 蒸汽温度调节方法
 - 烟气侧调节（粗调，调节量大，调节滞后，精度不高）
 - 分隔烟道挡板调节
 - 烟气再循环
 - 抽出部分低温烟气送入炉膛，降低辐射传热，增大烟气量，增强对流换热
 - 调节燃烧器角度（灵敏度高）
 - 改变燃烧中心位置，越高，对流蒸汽温度越高
 - 蒸汽侧调节（细调，调节量小）（单向调节，只能降温）
 - 喷水（混合式）减温器
 - 原理：将减温水雾化后直接喷入过热蒸汽中
 - 结构简单、调节灵敏、操作方便
 - 对水质要求高
 - 高压（超临界直流）锅炉：多级喷水降温器
 - 布置原则
 - 第一级在屏式过热器之间，喷水量大，粗调
 - 第二级在未级过热器之前，细调

以上内容整理于 [幕布文档](#)

省煤器和空预器

- 尾部受热面工作特点和作用

- 省煤器、空预器工作特点

- 锅炉对流烟道最后，尾部（低温）受热面
 - 承压（炉内微负压）受热面中，省煤器工作温度最低
 - 全机组中，空预器工作温度最低
 - 受热面金属温度低，（水蒸气、硫酸凝结）低温腐蚀
 - 烟气携带大量灰粒冲刷，飞灰磨损和积灰

- 省煤器作用

- 吸收低温烟气热量，降低排烟热损
 - 在给水进入锅炉前先加热，减少蒸发受热面吸热量
 - 减少给水与汽包壁温差，降低汽包热应力

- 空预器

- 利用烟气热量来加热燃烧所用的空气
 - 作用
 - 回收烟气热量，降低排烟热损
 - 预热空气，利于燃料研磨破碎（制粉系统），强化着火燃烧
 - 传热式（管式空预器）：热量通过传热面传递
 - 蓄热式（回转式空预器）：烟气和空气交替通过受热面

- 省煤器

- 类型及结构特点

- 按出口参数分
 - 沸腾式（中压锅炉，水蒸发潜热大，利用省煤器减轻水冷壁负荷）
 - 非沸腾式（高压锅炉，水加热需热大，利用水冷壁减轻省煤器负荷）
 - 按结构形式分
 - 光管式
 - 鳍片管式
 - 膜片管式
 - 螺旋肋片管式
 - 顺/错列

- 布置方式

- 卧式，利于停炉排水
 - 垂直于锅炉前墙
 - 管子较短，支吊简单

- 水流速低，流动阻力小
 - 可能导致烟道后墙漏风
 - 尾部烟道灰颗粒集中，磨损严重
- 平行于锅炉前墙布置
 - 支吊简单，检修方便
- 支吊方式
 - 支承结构：固定支架支撑在支承梁上
 - 悬吊结构
- 启动保护
 - 在省煤器进口与汽包下部或水冷壁供水包之间设置不受热的再循环管
- 管式空预器
 - 立式布置
 - 多个平行直管和两端管板组成
 - 较重，金属用量大
- 回转式空预器（我国应用较多）
 - 结构紧凑，重量轻，漏风量大，容易积灰
 - 受热面转动式
 - 二分仓空预器
 - 三分仓空预器（分别加热一次风、二次风）
 - 机壳
 - 转子
 - 受热面（传热部件）：从上到下温度渐低
 - 密封装置：减少空气和烟气的漏风
 - 携带漏风
 - 间隙漏风（主要）
 - 漏风危害
 - 排烟温度升高，热损增大
 - 增加输送烟气和空气的流动阻力
 - 增大引风机的电耗
- 风罩转动式

以上内容整理于 [幕布文档](#)

16结渣和高温积灰及高温腐蚀

重点：受热面高温结渣、腐蚀的机理与预防措施，受热面结渣、积灰倾向预测

▼ I 结渣

▼ 1积灰(沾污)结渣

▪ 积灰或沾污

指温度低于灰熔点时灰沉积物在受热面上的积聚，多发生在锅炉对流受热面上（过热器、再热器、省煤器、空预器）一般能用吹灰器清除

▪ 结渣

指在受热面壁上熔化了了的粘性灰沉积物的积聚，与灰成分、熔融温度、粘度及壁面温度有关，多发生在高温受热面上（炉膛、过热器、再热器）一般不能用吹灰器清除

▼ 2积灰(沾污)结渣形成原因和过程

▼ 积灰结渣三要素

- 煤燃烧→矿物质→灰份(粘土类)
- 炉内具有一定的温度(> 灰熔点)
- 炉内受热面存在(提供结渣场所)
- 以上为必要条件，还要有火焰冲刷，还原性气氛(缺氧燃烧、富燃料燃烧)

▼ 积灰(沾污)结渣过程

- 受热面积灰(沾污)结渣分三个阶段：
 - A.初期沉积物—富铁熔渣撞击管壁，粘性大；升华物质；
 - B.基质上部粘附飞灰颗粒；
 - C.温度升高，沉积速率提高，表面烧结→硬性渣物
- 初期沉积物形成机理：热扩散和涡流扩散；气化物质的凝结；碰撞或惯性碰撞

▼ 积灰(沾污)结渣的位置

- 结渣—炉膛内及出口高温对流受热面
- 积灰—炉膛内及尾部低温受热面、高温都有
- 易发生部位：炉内卫燃带、未敷水冷壁的炉墙、燃烧器喷口附近

▼ 3积灰(沾污)结渣对锅炉运行影响

沾污结渣→热阻↑→水冷壁吸热↓→锅炉出力↓

- 影响传热，因炉膛出口温度高，只能低负荷运行，甚至停炉清渣。经济性差
- 结渣、堵灰，热偏差、管壁超温，爆管，落渣熄火。安全性差

▼ 4影响结渣的主要因素

▼ 炉内温度水平和炉内负荷

- 温度越高，结渣越多

▼ 煤灰熔点和灰分组成

- 熔点低，容易结渣
- 硫铁矿和碱金属含量高易结渣

▪ 炉内气氛

▪ 炉内流场

如固相煤粉颗粒刷墙，煤粉气流的分离和存在旋涡死角，切圆燃烧时切圆直径过大，旋流燃烧时煤粉气流向炉墙水冷壁的扩散等，都会导致炉内熔化灰渣与水冷壁面的接触形成结渣

▼ 5积灰结渣类型

- 低温积灰——低温受热面腐蚀。多发生在低温区的省煤器和空预器上，与管子表面酸或水蒸汽凝结有关。
- 高温粘结性积灰——高温对流受热面腐蚀。一般发生在对流受热面上，与煤种有很大关系。
- 熔融性结渣——水冷壁高温腐蚀

▼ 6炉内结渣预测方法

▼ 燃料特性：主要根据煤灰特性和成分，如灰熔点、硅碳比等

- 碱/酸比(B/A)

$$B/A = \frac{\text{灰中碱性氧化物}}{\text{灰中酸性氧化物}} \\ = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

- 运行特性：热流变化，烟温、蒸汽温度变化等

▼ 灰特性预测积渣准确度分析

- 准确度不高的原因

①矿物质分布不均匀；②赋存形态不同；③测量时环境条件不同；④与燃烧过程有关，如锅炉形成、空气动力场

▼ 7积灰(沾污)结渣防止措施和运行优化

▼ 防治措施

▼ 运行方面

- 调整氧量：一般增加过量空气系数，有利于减轻结渣积灰

- 合理配风
 - 有合理的空气动力场和切圆大小；**
 - 射流有刚性、不倾斜、不冲刷炉墙；
 - 不能缺角运行，射流两侧补气条件良好；
 - 燃烧器有合理的长宽比和间隙；
 - 保证空气和燃料良好混合，避免还原性气氛。**
- 控制(降低)炉内温度水平和锅炉负荷
- 煤粉细度：粗会冲击炉墙；细沉积物增多
- 加添加剂
- 配煤：通过不同结渣特性燃料的配混，达到改善结渣目的。煤场配煤，锅炉不同喷口配烧。
- 烟气再循环
- 四角煤粉均匀化
- 吹灰器

▼ 设计方面

- 燃烧方式选择：固态排渣——灰熔点高；液态排渣——灰熔点低
- 炉膛出口温度设计合理
- 锅炉热负荷
 - 炉膛容积热负荷 q_V 和断面热负荷 q_F
 - 影响炉膛和燃烧器温度水平的重要因素。 q_V 、 q_F 高则炉膛和燃烧器温度结渣倾向高。
- 假想切圆直径：易结渣煤，采用小切圆
- 注意燃烧器和炉墙之间的间距
- 卫燃带的合理布置和设计（位置、数量和形式）
- 合适的对流受热面节距，易沾污，适当加大节距

▼ 预防结渣新技术

- 大小切圆，风包粉
- 水平浓淡燃烧技术
- 贴壁风或边界风
- 侧二次风、周界风、偏置周界风
- 内浓外淡旋流燃烧器

▼ II 受热面的高温腐蚀

- 燃烧产生有腐蚀性气体(气相)或化合物(固相)对金属管的腐蚀
- 位置: 水冷壁(一般是向火面), 高温受热面(过热器、再热器)

▼ 水冷壁腐蚀的条件

- 积灰和烟气中的腐蚀性物质

S和碱是重要因素

- 管壁及附近区域高温
- 管壁附近区域还原性气氛
- 火焰冲刷、积渣、磨损等加重腐蚀

▼ 影响高温腐蚀因素

- 燃料性质 (特别是燃煤的含硫量、含氯量等)

S加快腐蚀速度

- 温度影响 (主要指管壁温度和烟气温度)
温度越高, 腐蚀越快
- 气氛影响 (特别是水冷壁附近)
- 积灰 (结渣) 程度
- 空气动力场和燃烧工况

▼ 防治措施

- 控制管壁温度
- 控制燃烧气氛特别是水冷壁壁面附近的气氛
- 合理组织炉内燃烧工况, 防止水冷壁结渣、火焰中心偏斜或冲、刷墙等可能引起热偏差的现象发生
- 保证水动力的稳定以避免传热恶化的出现

▼ 加: 锅炉结渣与结焦的区别?

- 结焦: 结焦在循环流化床锅炉运行中较为普遍存在, 多发生在点火或压火过程中, 一般将结焦分为高温结焦和低温结焦两种。
 - i. 低温结焦就是当床层整体温度低于灰渣的变形温度, 由于局部超温或低温烧结引起的结焦。
 - ii. 高温结焦是指床层整体温度水平较高而流化正常时所形成的结焦现象。当床料中含碳量过高而未能适时调整风量或返料量时, 就有可能出现高温结焦。

17尾部受热面的磨损和低温腐蚀及积灰

重点：尾部受热面的磨损与预防措施、酸露点与空预器低温腐蚀及预防措施

▼ 1尾部受热面的磨损

- 定义：含有硬颗粒的流体相对于固体运动，使固体表面产生的磨损——冲蚀(冲击磨损)
- ▼ 两种冲蚀类型
 - 冲刷磨损—颗粒相对于固体表面冲击角较小，甚至接近平行
 - 撞击磨损—颗粒相对于固体表面冲击角较大，或接近于垂直
- 发生位置：低过、低再、省煤器和空预器区域
- ▼ 受热面磨损的区域
 - 管外烟气横向冲刷；管内烟气纵向冲刷
 - 错列管束， $s_1/d=s_2/d=2$ 时，最大磨损管排是第二排。以后各排磨损量大于第一排，小于第二排。 $s_1/d>2$ 时，最大磨损的管排不是在第二排，而是管束深处
 - 顺列管束布置，第一排管磨损最为严重
- ▼ 管外横向冲刷区域
 - 最大磨损量具体位置与管径及管节距有关
- ▼ 管内纵向冲刷
 - 明显产生磨损的部位，在烟气进口约100~150 mm或(1-3) d长的一段管壁处
 - 炉内易受热面磨损的区域：烟气流动方向变化；烟气走廊；吹损
- ▼ 磨损的危害
 - 受热面壁厚减小，强度降低，甚至破坏，导致管子泄漏，影响锅炉的安全运行
 - 增加检修工作量和钢材（修复或更换）耗量
- ▼ 飞灰冲击磨损的影响因素
 - 金属的磨损量与材料和灰粒的硬度比有关，灰粒硬度越高，磨损量越大（莫氏硬度）
 - 煤的磨损指数 I_c ，取决于石英和黄铁矿重量分额
 - SiO_2 和 Al_2O_3 是煤灰磨损主要影响因素，常将 SiO_2 和 Al_2O_3 的比值作为一种判定准则，比值越大，磨损越严重

- 尾部受热面的防磨措施

- 设计时合理选择**烟气流速**
- 降低速度分布不均匀和飞灰浓度分布不均匀
- 在磨损严重部位加装**防磨装置**
- 局部磨损严重的管排改用厚壁管
- 降低烟气中飞灰浓度
- 采用膜式省煤器或**鳍片管**式省煤器
- 采用较大的管排横向节距，增大烟气流通面积
- 减小灰粒直径

- ▼ **2空气预热器烟气侧低温腐蚀与堵灰**

- ▼ 烟气的水露点、酸露点和低温腐蚀、堵灰

- 水露点：**烟气中水蒸汽开始凝结的温度**。烟气中水蒸汽的露点低达45-54℃
- ▼ 酸露点：**烟气中硫酸蒸汽的凝结温度**。烟气酸露点可达140-160℃甚至更高
 - 烟气中SO₃浓度（或硫酸蒸汽浓度）越高，酸露点越高
 - 酸露点与燃料中的含硫量及燃烧方式有关
- 低温腐蚀：**硫燃烧后形成SO₂，氧化成SO₃，与烟气中水蒸汽结合成为硫酸蒸汽，当受热面的金属壁温低于酸露点时，硫酸蒸汽就会在壁面上凝结，对金属产生严重的腐蚀作用**
- 堵灰：硫酸蒸汽凝结成液态硫酸，不仅会腐蚀金属，而且还会粘结烟气中的灰颗粒，引起积灰，此外，沉积灰中的金属氧化物与酸液反应生成水硬性硫酸盐，使积灰硬化，严重时会造成烟气通道堵灰
- 腐蚀与堵灰相互促进
- 位置：空气预热器、省煤器、烟道、引风机、炉墙护板和烟囱

- ▼ 硫是形成低温腐蚀的主要因素

- ▼ 烟气中三氧化硫的形成主要有两种方式

- 一是燃烧反应中火焰里的部分氧分子与二氧化硫反应生成三氧化硫
燃料含硫量愈大，炉膛温度愈高，过量空气量愈多，生成的三氧化硫愈多
- 二是烟气中二氧化硫流经对流受热面遇到催化剂时，会与烟气中的过剩氧反应生成三氧化硫

- ▼ 影响烟气中SO₃含量的因素

- 煤的硫分Sar：Sar增大时，SO₃增多
- 炉膛温度TL：TL升高时SO₃增多
- 过量空气系数：aL增大，SO₃增多

- 煤的灰分Aar: Aar较大时, SO₃较少
- ▼ 低温腐蚀的预防措施
 - ▼ 设计上
 - 提高排烟温度
 - 热空气再循环, 提高进风温度, 从而提高排烟温度
 - 空预器进口冷风旁(短)路, 减少吸热量, 提高排烟温度
 - 加暖风器, 提高进风温度
 - 采用抗腐蚀材料
 - ▼ 结构布置上
 - 顺逆流交叉布置
 - 卧式管式空预器布置
 - 可采用回转式空预器
 - 将低于露点部分的空预器设计成整体独立式, 以便更换
 - ▼ 运行上
 - 采用低氧燃烧
 - 控制炉内温度水平
 - 控制炉内温度水平
 - 避免或减少尾部受热面漏风
 - 加添加剂
 - 烟气再循环
 - 防止积灰和腐蚀的相互促进

自然循环

- **自然循环工作原理：**工质依靠上升管受热所产生的密度差沿着闭合的路线运动。需要指出：蒸汽走的路线不是闭合的路线，在回路里，只有水在那里循环流动，所以又称为**水循环**
- **基本定义**
 - **循环流速：**上升管开始沸腾处的饱和水速
 - **质量含汽率：**上升管中汽水混合物中蒸汽的质量份额
 - **循环倍率：**进入上升管的循环水量与上升管出口产汽量之比，自然循环锅炉携带循环安全性的重要指标之一
 - **界限循环倍率：**在增加负荷到一定程度时，上升管的流动阻力的增加值大于流动压头的增加值，导致循环流速和循环流量下降，此时的循环倍率称为界限循环倍率
- **自然循环特性**
 - 吸热量影响流速
 - 受热强，流速大；受热弱，流速小
 - 自然补偿特性（循环倍率低于界限循环倍率失去）
 - 炉内受热上升管，炉外不受热下降管
 - 下降管给上升管供水
- **安全性指标**
 - 受热最弱，不停滞、倒流
 - **循环停滞：**回路中受热最弱的上升管内水的循环流速基本为零
 - **循环倒流：**上升管内水的流动方向与正常循环相反
 - 受热最强，不发生传热恶化
 - 回路循环倍率大于界限循环倍率
 - 不形成漩涡斗
 - 各循环回路流速和循环倍率在推荐范围内
 - 避免下降管带汽（流动阻力增加）
- **措施**
 - 减少受热不均
 - 确定合适的上升管吸热量
 - 确定合适的上升管高度和管径
 - 减少旋风分离器阻力
 - 减少下降管阻力
- **强制循环锅炉**
 - **直流锅炉工作原理：**工质一次通过受热面，没有循环的强制流动锅炉
 - 特点：

- 没有汽包
- 工质一次通过，强迫流动
- 受热面无固定界限

- 对比

- 传热过程

- 自然循环：蒸发受热面出口质量含汽率最大为0.286,不出现**第二类传热恶化**
 - 直流锅炉：一次通过，质量含汽率有0到1，**第二类传热恶化**一定出现
 - **第一类传热恶化**:当热负荷很高时,管子内壁汽化核心数急剧增加,汽泡形成速度产过汽泡脱离速度,使管子壁面形成一个连续的蒸汽膜,传热系数急剧下降,壁温急剧上升,这种由核态沸腾转变为膜态沸腾的传热恶化称为第一类传热恶化。
 - **第二类沸腾传热恶化**:当质量含汽率很大时,出现了液雾状流动结构,这时管中连续的水膜被撕破,传热系数下降,管壁温度大大升高,这个现象称为第二类传热恶化。（决定于含汽率）

- 热化学过程

- 自然循环锅炉：**有汽包**，可进行排污
 - 直流锅炉：**无汽包**，给水品质要求高